

Определение концентрации галлия в германии, трансмутационно легированном нейтронами, из измерений сопротивления в области прыжковой проводимости

© О.П. Ермолаев[¶], Т.Ю. Микульчик

Белорусский государственный университет,
220050 Минск, Белоруссия

(Получена 21 апреля 2003 г. Принята к печати 2 июня 2003 г.)

Рассматриваются способы определения концентрации галлия в германии, трансмутационно-легированном тепловыми и надкадмиевыми нейтронами, из измерений удельного сопротивления в области низких (гелиевых) температур. Для оценки концентрации галлия предлагается использовать концентрационные зависимости прыжкового сопротивления ρ_3 и удельного сопротивления, измеренного при температуре 2.5 К.

1. Введение

Метод нейтронно-трансмутационного легирования полупроводников [1] привлекает внимание исследователей в связи с его преимуществами перед обычными металлургическими методами введения примесей. Преимуществами являются высокая точность легирования и высокая однородность распределения примесей. В результате нейтронно-трансмутационного легирования получается германий p -типа проводимости (основной примесью является галлий), причем степень компенсации (K) определяется энергетическим спектром реакторных нейтронов и его жесткостью (например, [2]). Нейтронно-трансмутационно легированный германий служит удобным объектом для исследования фундаментальных проблем проводимости в примесной зоне и перехода диэлектрик–металл, а также является ведущим материалом для создания низкотемпературных термометров сопротивления и детекторов высокоэнергетических частиц.

В связи с этим важным является вопрос определения концентраций трансмутационно введенных примесей. Одним из традиционных методов определения концентраций примесей является исследование эффекта Холла. Однако вырождение валентной зоны германия p -типа проводимости, т. е. наличие зон легких и тяжелых дырок, зависимость холл-фактора от концентрации примеси и магнитного поля затрудняет определение концентрации галлия (N_A). Вклад легких дырок в эффект Холла для сложной валентной зоны германия и его зависимость от уровня легирования исследовались в [3]. Экспериментальное определение коэффициента Холла представляет собой трудоемкую задачу. Оценить концентрацию галлия можно из анализа температурных зависимостей концентрации свободных носителей заряда. Одна из основных причин, ограничивающих применение этого метода, — взаимодействие примесей при их концентрации больше чем $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Более простым методом оценки концентрации основной примеси является анализ температурных зависимостей сопротивления в области

прыжковой проводимости. Как известно, при не слишком низких температурах в области прыжковой проводимости с постоянной энергией активации (ε_3) удельное сопротивление имеет вид

$$\rho = \rho_3 \exp \frac{\varepsilon_3}{kT}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура, ρ_3 — предэкспоненциальный множитель, который определяется [4]

$$\rho_3 \propto \exp \frac{\alpha(K)}{aN_A^{1/3}}, \quad (2)$$

где $\alpha(K)$ — функция, зависящая от степени компенсации, a — борковский радиус примеси. Согласно (2), прыжковая проводимость очень чувствительна к изменению концентрации основной примеси. Энергия ε_3 не зависит от температуры и имеет вид [4]

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{e^2 N_A^{1/3}}{\chi} \right) F(K), \quad (3)$$

где e — заряд электрона, χ — диэлектрическая проницаемость, $F(K)$ — некоторая универсальная функция степени компенсации.

В настоящей работе рассматриваются методы определения концентрации галлия в германии, трансмутационно легированном тепловыми и надкадмиевыми (быстрыми) нейтронами, из измерений сопротивления в области прыжковой проводимости.

2. Методика эксперимента

Нами исследовались образцы нелегированного германия с концентрацией электронов $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Образцы облучались различными флюенсами реакторных нейтронов, при этом поток быстрых нейтронов с энергией $E \geq 0.1 \text{ МэВ}$ составлял $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} < \Phi_f < 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Для отсеки медленного компонента реакторного спектра нейтронов ($E < 0.5 \text{ эВ}$) и для ослабления факторов, связанных с ядерным легированием

[¶] E-mail: ermolaev@bsu.by

тепловыми нейтронами, образцы облучались в кадмиевых пенах с толщиной стенок 0.5 мм. При облучении отношение флюенсов тепловых (Φ_{th}) и быстрых нейтронов было около 10. Такие значения толщины кадмиевого экрана и соотношение Φ_{th}/Φ_f довольно часто используются в экспериментах. После облучения образцы подвергались отжигу в течение 24 ч при температуре $+450^\circ\text{C}$. Измерялось удельное сопротивление образцов в интервале температур $1.5 < T < 4.2\text{ K}$.

3. Обсуждение экспериментальных результатов

Метод определения концентрации основной примеси путем исследования температурных зависимостей прыжковой проводимости состоит в следующем. С помощью линейной аппроксимации низкотемпературных участков температурной зависимости удельного сопротивления в аррениусовском масштабе с последующей экстраполяцией к $1/T = 0$ находят величину удельного сопротивления ρ_3 . В работах [5–10] при анализе величины удельного сопротивления, экстраполированного к $1/T = 0$, использовался механизм прыжковой проводимости с постоянной энергией активации ε_3 (1). Затем по концентрационной зависимости $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$ оценивают концентрацию основной примеси.

На рис. 1 представлены концентрационные зависимости $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$ для германия, трансмутационно легированного тепловыми нейтронами. Использовались данные разных авторов за многие годы [5–8,10]. Ранее считалось [1,5], что в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами, $K = 0.4$. Эволюция ядерно-физических данных привела к значению степени компенсации в данном материале $K = 0.3$, что подтверждается экспериментальными данными, полученными в [11–14,2]. При сопоставлении данных разных авторов экспериментальные данные [5–7,10] были скорректированы по концентрации с учетом того, что $K = 0.3$.

При $N_A \leq 1 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ экспериментальные данные можно аппроксимировать прямой с наклоном, который соответствует $a_1 \approx 90\text{ \AA}$. В рамках метода эффективной массы для германия, легированного галлием, также была определена величина $a_1 \approx 90\text{ \AA}$ [4]. Заметим, что в данной области концентраций экспериментальные данные согласуются с теоретической зависимостью $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$, полученной в [9]. При $1 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3} < N_A < 3 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ наблюдается отклонение от линейной зависимости, что может быть связано с режимом многоэлектронных перескоков (см., например, [15]). Область концентраций от $N_A = 3 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ до перехода диэлектрик–металл и даже дальше детально измерялась в [5,8,10]. Нами показано, что в данной области концентраций экспериментальные данные [5,8,10] аппроксимируются прямой с наклоном, который соответствует $a_2 \approx 57\text{ \AA}$. Уменьшение бор-

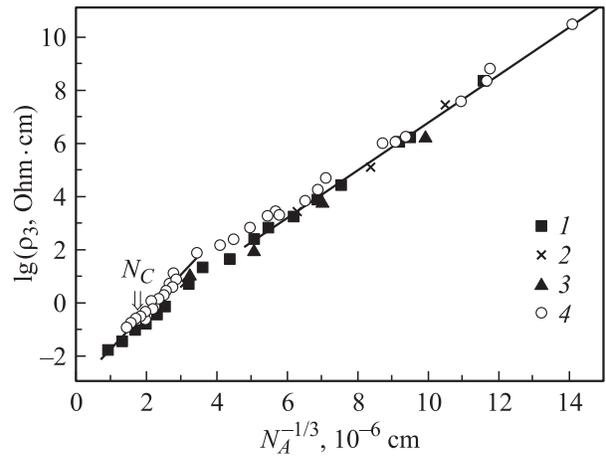


Рис. 1. Удельное сопротивление ρ_3 как функция концентрации галлия N_A . 1 — экспериментальные данные из работ [5,10]; 2, 3, 4 — экспериментальные данные из работ [6,7,8] соответственно. Сплошные линии — линейная аппроксимация.

ского радиуса дырки в германии p -типа с увеличением концентрации примеси обсуждалось ранее [6,8,16] и связано с изменением асимптотики волновых функций при приближении к переходу диэлектрик–металл. Критическая концентрация перехода диэлектрик–металл для некомпенсированного германия, легированного галлием, $N_C = 1 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ [17]. Из критерия Мотта $N_C^{1/3}a = 0.26 \pm 0.05$ [18] следует, что $a = 56 \pm 11\text{ \AA}$. Близкие значения боровского радиуса были найдены разными авторами. Значение $a_2 = 57\text{ \AA}$, найденное нами из прыжковой проводимости, хорошо согласуется с боровским радиусом, определенным из критерия Мотта. Близость боровского радиуса, найденного из измерений прыжковой проводимости в области промежуточных концентраций и из критерия Мотта, также отмечалась в [8].

Проанализировав экспериментальные результаты многих авторов, мы предлагаем для определения концентрации галлия в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами, использовать концентрационную зависимость $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$, которая состоит из двух линейных зависимостей, описывающихся формулой (2), где $a_1 = 90\text{ \AA}$ в области концентраций $N_A \leq 1 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ и $a_2 = 57\text{ \AA}$ при $N_A \geq 3 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ (вплоть до перехода диэлектрик–металл).

Оценить концентрацию галлия в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами, более простым способом можно по концентрационной зависимости удельного сопротивления при $T = 2.5\text{ K}$ $\{\rho_{2.5} = f(N_A)\}$. При $T = 2.5\text{ K}$ проводимость имеет прыжковый характер, а, как известно, прыжковое сопротивление является чувствительной функцией концентрации основной примеси, по которой осуществляется прыжковая проводимость. Данный способ является менее трудоемким по сравнению с определением концентрации галлия по зависимости $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$,

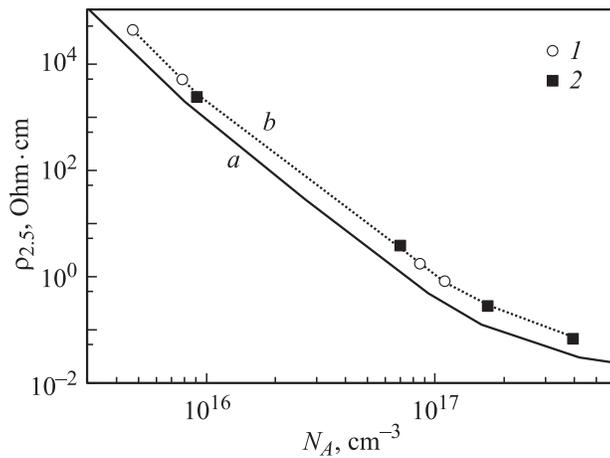


Рис. 2. Удельное сопротивление при $T = 2.5$ К как функция концентрации галлия N_A . a — данные из работы [17]; b — данные настоящей работы: 1 — наши данные, 2 — данные из работы [19].

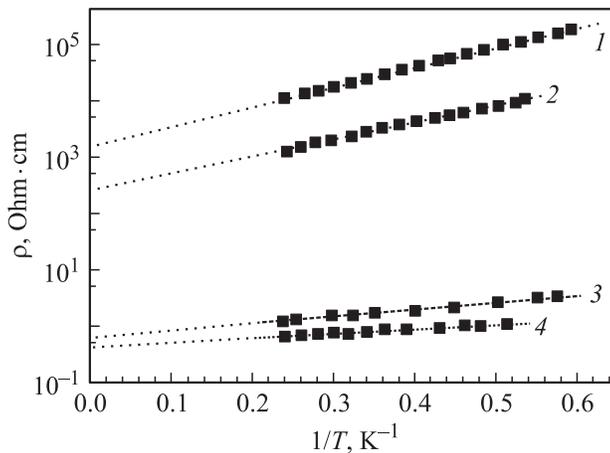


Рис. 3. Температурные зависимости удельного сопротивления германия, трансмутационно легированного надкадмиевыми нейтронами. 1 — $N_A = 4.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 2 — $N_A = 7.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 3 — $N_A = 8.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4 — $N_A = 1.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

так как не требуется измерять температурную зависимость удельного сопротивления в широком диапазоне. Для определения концентрации галлия по зависимости $\rho_{2.5} = f(N_A)$ нужно измерить значение удельного сопротивления лишь при $T = 2.5$ К. На рис. 2 (кривая a) представлена зависимость $\rho_{2.5} = f(N_A)$ для германия, трансмутационно легированного тепловыми нейтронами [17], в широком интервале концентраций (вплоть до перехода диэлектрик–металл и дальше). Кривая скорректирована по концентрации с учетом, что $K = 0.3$.

На практике часто необходимо определить концентрацию галлия в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами. В этом случае использовать зависимость $\rho_{2.5} = f(N_A)$ для германия, трансмутационно легированного тепловыми нейтронами, нельзя. Следовательно, необходимо получить зави-

симость $\rho_{2.5} = f(N_A)$ для германия, трансмутационно легированного надкадмиевыми нейтронами.

Температурные зависимости удельного сопротивления в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами, представлены на рис. 3, все образцы при $T < 4.2$ К обладают прыжковой проводимостью. Исследование прыжковой проводимости в данном материале также проводилось в работах [19,20]. Образцы в наших экспериментах и в работе [19] облучались в сходных условиях. Концентрация галлия в исследуемых нами образцах определялась из найденных значений ρ_3 с учетом боровских радиусов $a_1 = 90 \text{ \AA}$ (для $N_A \leq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и $a_2 = 57 \text{ \AA}$ (для $N_A \geq 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и зависимости (2).

На рис. 2 (кривая b) дана зависимость $\rho_{2.5} = f(N_A)$ для германия, трансмутационно легированного надкадмиевыми нейтронами. Для нахождения концентрации галлия в образцах из работы [19] анализировались данные прыжковой проводимости по вышеописанной методике.

Как видно из рис. 2, наблюдается качественное согласие между экспериментальными данными для германия, трансмутационно легированного тепловыми и надкадмиевыми нейтронами. Небольшое количественное различие связано с тем, что степень компенсации в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами ($K \approx 0.5$ [2]), превышает степень компенсации в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами. Согласно (1) удельное сопротивление зависит от ρ_3 и ε_3 . Значения $\alpha(K)$ из формулы (2) для $K = 0.3$ и $K = 0.5$ соответственно равны 1.79 и 1.81 [4], что приводит к небольшому количественному различию в величине ρ_3 при одинаковой концентрации примеси. Значения $F(K)$ из формулы (3) для $K = 0.3$ и $K = 0.5$ соответственно равны 0.7 и 0.75 [4], следовательно, ε_3 в германии, легированном надкадмиевыми нейтронами, больше, чем в германии, легированном тепловыми нейтронами, при одинаковой концентрации примеси. Значит, согласно (1) для германия, легированного надкадмиевыми нейтронами, кривая удельного сопротивления будет расположена выше по сравнению с германием, легированным тепловыми нейтронами, при одинаковой концентрации примеси. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными, представленными на рис. 2.

4. Заключение

Таким образом, определить концентрацию галлия в трансмутационно легированном нейтронами германии можно по найденному из температурных зависимостей прыжковой проводимости значению ρ_3 с использованием концентрационной зависимости $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$, которая состоит из двух линейных зависимостей, описывающихся формулой (2), где $a_1 = 90 \text{ \AA}$ в области концентраций $N_A \leq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $a_2 = 57 \text{ \AA}$ при $N_A \geq 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (вплоть до перехода диэлектрик–металл). Более про-

стым способом оценить концентрацию галлия в германии, трансмутационно легированном нейтронами, можно по сопротивлению, измеренному в области температур, при которых проводимость осуществляется прыжковым механизмом, например, при $T = 2.5$ К. Зависимости $\rho_{2.5} = f(N_A)$ для германия, трансмутационно легированного тепловыми и надкадмиевыми нейтронами, позволяют оценить концентрацию галлия по измеренному значению удельного сопротивления при $T = 2.5$ К.

Список литературы

- [1] К. Ларк-Горовиц. В сб.: *Полупроводниковые материалы* (М., ИЛ, 1954) с. 62.
- [2] А.Г. Забродский, М.В. Алексеенко. ФТП, **28**, 168 (1994).
- [3] М.В. Алексеенко, А.Г. Забродский, Л.М. Штеренгас. ФТП, **32**, 811 (1998).
- [4] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979); ФТП, **14**, 825 (1980).
- [5] H. Fritzsche, M. Cuevas. Phys. Rev., **119**, 1238 (1960).
- [6] J.A. Ghrobczek, H. Fritzsche, C.L. Jiang. Phil. Mag. B, **44**, 685 (1981).
- [7] А.Р. Гаджиев, И.С. Шлимак. ФТП, **6**, 1582 (1972).
- [8] А.Г. Забродский, А.Г. Андреев, М.В. Алексеенко. ФТП, **26**, 431 (1992).
- [9] Н.А. Поклонский, С.Ю. Лопатин, А.Г. Забродский. ФТТ, **42**, 432 (2000).
- [10] Н. Мотт, У. Туз. УФН, **79**, 691 (1963).
- [11] А.Г. Забродский. Письма ЖЭТФ, **33**, 258 (1981).
- [12] А.Г. Беда, В.В. Вайнберг, Ф.М. Воробкало. ФТП, **15**, 1546 (1981).
- [13] Ю.А. Осипьян, В.М. Прокопенко, В.И. Тальянский. ЖЭТФ, **87**, 269 (1984).
- [14] М.В. Алексеенко, А.Г. Андреев, А.Г. Забродский. Письма ЖТФ, **13**, 1295 (1987).
- [15] M. Pollak, M.L. Knotek. Sol. St. Commun., **21**, 183 (1977).
- [16] Е.М. Гершензон, И.Н. Куриленко, Л.Б. Литвак-Горская. ФТП, **8**, 1186 (1974).
- [17] H. Fritzsche. *The Metal-Nonmetal Transition in Disordered Systems*, (ed. by L.R. Friedman, D.P. Tunstall, Scottish Univ. Summer School Publication, 1978) p. 193.
- [18] Н. Мотт, Э.Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1982).
- [19] М.Л. Кожух, Н.С. Липкина. ФТП, **21**, 284 (1987).
- [20] О.П. Ермолаев. ФТП, **28**, 2021 (1994).

Редактор Л.В. Беляков

Evaluation of gallium content in germanium, the latter being doped by neutrons in transmutation(al) way, while resistance measurements have been made within the hopping conduction range

O.P. Yermolaev, T.Yu. Mikulchik

The Byelorussian State University,
220050 Minsk, Belarus